

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子

邢辉, 段树林*, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安

(大连海事大学轮机工程学院, 大连 116026)

摘要: 基于燃油消耗和基于船舶活动两种方法准确测算我国水路运输行业的废气排放量, 对我国生产的分别满足国际海事组织(International Maritime Organization, IMO) NO_x Tier I、Tier II 标准的 76 台和 113 台船用柴油机母型机排放测试报告进行了统计分析, 研究确定了二冲程主机、四冲程主机和四冲程副机 NO_x、CO、HC 和 CO₂ 基于燃油的排放因子和基于做功的排放因子。结果表明, 不同类型柴油机 NO_x、CO、HC 和 CO₂ 基于燃油的排放因子分别为 30.67~76.55、3.01~6.13、1.25~2.24 和 3 141.15~3 165.63 kg·t⁻¹; 不同类型柴油机 NO_x、CO、HC 和 CO₂ 基于做功的排放因子分别为 6.83~13.64、0.61~1.35、0.21~0.50 和 534.04~745.18 g·(kW·h)⁻¹。不同类型柴油机基于做功的排放因子与柴油机负荷密切相关, 并可用幂函数或二次多项式来表达其关系; 另外, 通过对国外机构采用的排放因子进行简单的修正难以真实反映我国船用柴油机排放技术水平。相关研究结果为我国船舶排放清单的测算提供了具有适用性的基础数据。

关键词: 水路运输; 船用柴油机; 废气排放; 基于燃油的排放因子; 基于做功的排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3750-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.011

Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China

XING Hui, DUAN Shu-lin*, HUANG Lian-zhong, HAN Zhi-tao, LIU Qin-an

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Water-borne transportation plays an important role in the economic and social development and contributes greatly to air pollution in China as well. An effective regulating policy is dependent on accurate estimation in terms of sorts, quantification and location of emissions. However, there is insufficient real and reliable data source for China's marine diesel engines and vessels. In order to employ fuel-based approach and ship activity-based approach to estimate accurately the exhaust emissions from water-borne transportation sector in China, emission factors of different types of marine diesel engines were investigated. Based on statistical analysis on Parent Engine emission test reports of 76 and 113 marine diesel engines manufactured by China's engine makers in accordance with IMO NO_x Tier I and Tier II standards respectively as defined in MARPOL(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) Annex VI, abnormal data were statistically identified and eliminated by Grubbs' criterion method, fuel-based emission factors and energy-based emission factors of NO_x, CO, HC and CO₂ for 2-Stroke main engines, 4-Stroke main engines and 4-Stroke auxiliary engines were determined respectively. The results showed that fuel-based emission factors of NO_x, CO, HC and CO₂ for different types of marine diesel engines were 30.67-76.55, 3.01-6.13, 1.25-2.24 and 3 141.15-3 165.63 kg·t⁻¹ respectively. Energy-based emission factors of NO_x, CO, HC and CO₂ for different types of marine diesel engines were 6.83-13.64, 0.61-1.35, 0.21-0.50 and 534.04-745.18 g·(kW·h)⁻¹ respectively. In addition, the relationships of energy-based emission factors against engine load were expressed by power function or quadratic polynomial and the algorithm coefficients were determined. In addition, it is difficult to obtain the true emission levels of marine diesel engines in China through simple modification of emission factors reported by foreign institutes. In particular, considering the diversity of diesel engines onboard China's coastal and inland vessels, more samples and tests in terms of types and operational conditions are necessary to provide basic data for marine emission inventories in China. The results could provide applicable data for estimation of marine emissions in China.

Key words: water-borne transportation; marine diesel engine; exhaust emissions; fuel-based emission factor; energy-based emission factor

根据交通运输行业发展统计公报^[1], 截止 2014 年末, 全国拥有水上运输船舶 17.20 × 10⁴ 艘, 其中内河运输船舶 15.83 × 10⁴ 艘, 沿海运输船舶 11 048 艘, 远洋运输船舶 2 603 艘。水路运输为我国经济社会发展做出了巨大的贡献, 同时也带来了较严重的环境污染问题。多位学者^[2-4] 的研究表明: 2010 年, 货船水运在广东领海区域内的温室气体排放量为 7.3 × 10⁶ t; 2010 年, 上海港船舶排放的 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 达到全市排放清单总量的 12.0%、

9.0% 和 5.3%; 2012 年, 大连海域远洋船舶 PM₁₀、NO_x、SO_x、CO 和 HC 排放量分别为 5 785、51 451、49 437、4 677 和 2 010 t, 而 CO₂ 排放量为 2.9 × 10⁶ t。目前, 国内外对水路运输船舶废气排放测算所采

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 交通运输部科技计划项目(2015328225150); 中央高校基本科研业务费专项(3132016018, 3132016336)

作者简介: 邢辉(1980~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为船舶排放测试与评价, E-mail: xingcage@163.com

* 通讯联系人, E-mail: oliverduan@163.com

用的方法主要有两种^[2, 4~6]: 根据船舶燃油消耗量采用自上而下的方法; 根据船舶活动采用自下而上的方法. 两种方法均需要获取有效的排放因子, 即基于燃油的排放因子(质量排放量因子, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)或基于做功的排放因子[比排放量因子, $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$]. 目前仅有一些国际机构给出了一些参考值, 如 IMO、政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)、欧洲环境署(The European Environment Agency, EEA)、美国国家环境保护局(United States Environmental Protection Agency, USEPA)、瑞典环境科学研究院(Swedish Environmental Research Institute, IVL)、劳氏船级社(Lloyd's Register of Shipping, LR)、Entec 公司和 ICF 国际咨询公司等.

各机构的排放因子主要来自国外多个学者针对多个国家或地区开展的船舶废气排放测算的基础研究. Trozzi 等^[7]采用基于燃油消耗的方法进行了意大利 2 个港口的海运排放测算. Corbett 等^[8]较早给出了船用柴油机的排放因子并为广大学者及研究机构所引用. Cooper^[9]根据 6 艘在港船舶的 22 台船用柴油机的排放测试, 得出了在给定负荷范围内 NO_x 、CO、HC、 CO_2 、 SO_2 和 PM 的比排放量因子, 并指出不同机型、不同负荷条件其排放因子差异较大. Hulskotte 等^[10]统计了荷兰鹿特丹港船舶的活动情况, 建立了各类船舶总吨与船舶燃油日消耗量间的拟合关系, 并给出了各污染物基于柴油机类型和燃油品质的排放因子. Schrooten 等^[11]考虑不同的国家、船舶类型和大小以及技术进展测算了各大气污染物的排放因子, 相关研究结果为港口城市海运排放的准确预测和评价提供了有效手段. 文献[12~15]对航运 SO_2 和 PM 排放进行了系统的研究. Eyring 等^[16]对航运业的大气排放进行了系统的论述并对比了 Entec、Corbett 和 Kohler、Endresen 等机构或学者的排放因子, 所用数据有明显的差异. Miola 等^[17]、Blasco 等^[18]对船舶废气排放建模方法和数据来源进行了综述, 指出多个机构或学者的研究所使用的船舶大气污染物排放因子主要来源于 IMO、IPCC、EEA 等机构或文献[8,9].

国内学者对各地区船舶排放的测算主要是引用国外的数据. 文献[2, 19~22]对我国香港及珠三角地区的海运排放进行测算时使用的是 Entec、LR、ICF 及 USEPA 的排放因子. 文献[3, 4, 23]综合了 IPCC、Entec、IVL、ICF 及 USEPA 的排放因子, 确定了上海港及大连海域的船舶排放清单. 文献[24]采

用基于燃油消耗的方法开展了中国国际海运船队温室气体排放量测算, 海运燃油 CO_2 排放因子根据 IPCC 指南^[25]取值 $3.13 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$. 国内船舶排放因子的研究仅见文献[26, 27]以京杭大运河内的 12 艘货运船舶为样本, 对我国内河运输船舶的排放因子进行了实船测试研究, 初步形成了主机功率 300 kW 以下我国内河运输船舶不同运行工况下的排放参考数据. 但是, 大量的沿海及内河运输船舶配置的是较大功率的柴油机, 这类船舶单船排放量更大. 针对该类船舶通过开展实船测试来确定其排放技术水平和排放特征, 可操作性及经济性均较差; 而且受测试条件和测试样本数的限制, 测试结果也难以具有普遍适用性. 因此, 为全面深入了解我国船舶及船用柴油机的排放技术水平和排放特征, 本研究针对我国生产的满足 IMO NO_x Tier I 和 Tier II 标准的 189 台船用柴油机母型机的排放测试报告进行统计分析, 得出我国各类型船用柴油机 NO_x 、CO、HC 和 CO_2 排放因子, 以期有效计算我国水路运输船舶的实际排放提供可靠的基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究对象和数据来源

船用柴油机主要包括推进柴油机(主机, 记作 ME)和发电柴油机(副机, 记作 AE). 其中, 根据船舶大小和类型, 可用作主机的有大型二冲程低速柴油机(记作 SSD, 标定转速 $n_b \leq 300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)、四冲程中速柴油机(记作 MSD, $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1} < n_b \leq 1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)和四冲程高速柴油机(记作 HSD, $n_b > 1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$); 可用作副机的有 MSD 和 HSD. IMO 船用柴油机氮氧化物排放控制技术规则^[28]及国家标准^[29]要求的船用柴油机排放台架测试项目为 NO_x 、CO、HC 和 CO_2 , 其中主机按 E3 工况运行, 测量 25%、50%、75% 和 100% 标定负荷 4 个工况点; 带调距桨恒速运转的主机按 E2 工况运行, 标定转速下测量 25%、50%、75% 和 100% 标定负荷 4 个工况点; 副机按 D2 工况运行, 标定转速下测量 10%、25%、50%、75% 和 100% 标定负荷 5 个工况点. IMO 技术规则^[28]仅要求对船用柴油机同一族/组母型机进行排放台架测试, 同时也明确了难以实现在船运行期间的排放监测. 不同母型机及其不同测试工况下的排放因子均存在差异, 选择一台或几台母型机的测试结果也难以真实反映我国船用柴油机的排放水平. 因此, 通过收集、统计和分析大量的不同生产阶段、不同类型和不同型号的船用柴油

机母型机排放测试报告,得到一个统计平均的结果才有可能比较准确反映我国船用柴油机总体的排放水平。

大连海事大学排放测试中心自 2002 年成立以来,累计针对我国生产的 200 余台船用柴油机母型机开展了排放测试工作,积累了丰富的测试经验和测试数据,为本研究的开展提供了可能。另外,本研究还从船用柴油机生产厂家以及多个船级社收集到部分船用柴油机母型机排放测试报告(由其他的排放测试中心出具的报告)作为补充,力求比较全面、真实反映我国船用柴油机的排放技术水平。针对 IMO NO_x Tier I 阶段的船用柴油机,共收集到我国不同柴油机生产厂家于 2001 ~ 2010 年(其中中、高速机仅有 2005 ~ 2010 年的数据)生产的船用柴油机母型机排放测试报告 76 份,其中低速主机 17 台;中速主机 19 台;高速主机 11 台;中速副机 14 台,另有 3 台中速机用作主机带调距桨恒速运转,也按副机运行工况分析;高速副机 12 台。针对 IMO NO_x Tier II 阶段的船用柴油机,共收集到我国不同柴油机生产厂家于 2011 ~ 2015 年生产的船用柴油机母型机排放测试报告 113 份,其中低速主机 22 台;中速主机 11 台;高速主机 32 台;中速副机 5 台,另有 12 台中速机用作主机带调距桨恒速运转,也按副机运行工况分析;高速副机 25 台,另有 6 台高速机用作主机带调距桨恒速运转,也按副机运行工况分析。低速机包括我国柴油机生产厂家许可生产的 MAN 公司缸径 500、600、700 和 800 mm 的 S-MC-C、S-ME-B、S-ME-C、G-ME-C 系列母型机和 Wärtsilä 公司缸径 580、720 mm 的 RT-Flex 和 X 系列母型机。低速机功率范围涵盖 7 440 ~ 26 000 kW,转速范围为 69.6 ~ 127 r·min⁻¹。MAN 公司和 Wärtsilä 公司的二冲程低速机占据了世界船用低速机市场超过 90% 的市场份额,而且本研究所统计的低速机型号基本涵盖了我国柴油机生产厂家引进生产的主流机型。中、高速机包括我国柴油机生产厂家许可生产的 MAN 公司 L 系列 210、320 船用柴油机及自主研发生产的缸径 105 ~ 330 mm 不同系列的船用柴油机。中、高速机功率范围涵盖 132 ~ 4 500 kW,转速范围为 620 ~ 2 230 r·min⁻¹。中、高速机统计范围基本涵盖了我国自主研发生产的各系列柴油机,但还缺少我国引进生产的 Wärtsilä、Daihatsu 和 Cummins 等公司的部分中、高速机机型。因此,除了部分中、高速机母型机排放测试样本有欠缺,本研究的统计结果基本能反映我国生产的满足 IMO NO_x Tier I 和 Tier II 标准的船用柴油机的

排放技术水平。

1.2 数据处理

由于船用柴油机体积、重量较大,在生产车间进行现场台架测试时也难以获得比较理想的试验条件,不排除在测试过程中出现粗大误差的可能。多台柴油机不同测试工况下的测试结果中可能会出现部分柴油机与其它柴油机测试结果明显不一致的异常数据。异常数据的出现会极大地降低数据的质量,导致统计分析结果发生显著变异。因此,异常数据的识别和剔除具有重要意义。本研究采用格拉布斯(Grubbs)准则法对异常数据进行统计识别和剔除。将同一类型柴油机同一测试工况下的各废气成分基于燃油的排放因子和基于做功的排放因子分别组成一个数据集,设显著性水平 α 为 0.05(相当于置信度为 95%),将每一数据集中疑似最大异常值和疑似最小异常值与查表得到的格拉布斯临界值进行比较,若识别为异常数据,则予以剔除;重复识别与剔除异常数据,直至余下数据的最大值或最小值均小于格拉布斯临界值为止。采用该方法得出的统计识别结果与主观判断的结果基本吻合。

2 结果与讨论

各类型船用柴油机废气排放因子随机型、生产年份和燃油品质而异,但船舶废气排放测算过程中难以对进出港船舶主机、副机的具体信息进行准确统计。因此,为便于编制船舶排放清单时对本研究统计分析结果的应用,本研究并不按转速对柴油机类型进行详细区分,仅将柴油机类型分为二冲程(记作 2S)主机、四冲程(记作 4S)主机和四冲程副机,依据收集到的满足 IMO NO_x Tier I 和 Tier II 标准的船用柴油机母型机排放测试报告进行废气排放因子的综合分析。

2.1 基于燃油的排放因子

采用基于燃油消耗的方法测算船舶废气排放量时,除了要求能统计出船舶消耗的燃油总量外,另一个很重要的工作就是确定基于燃油的排放因子。根据柴油机排放台架测试过程中测量得到的燃油质量流量以及经测量和计算得到的各废气成分的质量流量,计算得到每台柴油机在每一测试工况下的各废气成分基于燃油的排放因子。

采用基于燃油消耗的方法一般均没有考虑船舶主、副机运行工况,但柴油机在不同的运行工况其各成分废气排放因子存在差异。而且对于不同的母型机,不同测试工况下的排放因子也并没有明显一

致的变化规律. 选择某一测试工况下的排放因子或将各测试工况下的排放因子进行简单的平均难以科学反映该母型机的排放水平. 因此, 本研究将文献[28, 29]给定的确定 NO_x 排放水平的方法同样用于计算 CO 、 HC 和 CO_2 排放因子, 利用不同试验循环的加权系数将各测试工况点的测试结果进行加权处理, 计算得到加权平均的结果用来反映该母型机的排放水平. 该方法可表达为:

$$\text{EF}_{k, \text{ME}}^f = \text{EF}_{k, 100\% P_{\text{ME}}}^f \times 0.2 + \text{EF}_{k, 75\% P_{\text{ME}}}^f \times 0.5 + \text{EF}_{k, 50\% P_{\text{ME}}}^f \times 0.15 + \text{EF}_{k, 25\% P_{\text{ME}}}^f \times 0.15 \quad (1)$$

$$\text{EF}_{k, \text{AE}}^f = \text{EF}_{k, 100\% P_{\text{AE}}}^f \times 0.05 + \text{EF}_{k, 75\% P_{\text{AE}}}^f \times 0.25 + \text{EF}_{k, 50\% P_{\text{AE}}}^f \times 0.3 + \text{EF}_{k, 25\% P_{\text{AE}}}^f \times 0.3 + \text{EF}_{k, 10\% P_{\text{AE}}}^f \times 0.1 \quad (2)$$

式中, EF^f 为基于燃油的排放因子, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; ME 为主机; AE 为副机; k 为废气成分; P 为标定功率 (表

示柴油机负荷的大小, 不参与计算, 无单位).

对各船用柴油机母型机在各测试工况下的质量排放量因子按式(1)、(2)进行加权处理, 然后按柴油机类型取算术平均值, 得到各类型柴油机 NO_x 、 CO 、 HC 和 CO_2 基于燃油的排放因子, 如表 1 所示. 其中 NO_x 排放因子均低于 IMO 研究报告^[5, 6] 由各国专家达成的共识性数据, 这是因为 IMO 数据主要来源于 Entec、IVL 等机构早期的研究, 而对于本研究分析对象, NO_x 排放技术水平已经有了较大的提高; CO 和 HC 排放因子分别比 IMO 数据偏高和偏低, 也没有明显的规律性; CO_2 排放因子介于 IMO 确定的使用船用蒸馏油时的数据 ($3\ 206 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 和使用船用残渣油时的数据 ($3\ 114 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) 之间, 这是因为 IMO 数据是根据燃油碳含量及 CO_2 和碳分子量理论计算得来的, 与实际测量值通常会存在一定的差异.

表 1 基于燃油的排放因子¹⁾/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

Table 1 Fuel-based emission factors/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

柴油机类型	$\text{EF}_{\text{NO}_x}^f$				EF_{CO}^f			EF_{HC}^f			$\text{EF}_{\text{CO}_2}^f$ ³⁾		
	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[6]		$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[6]	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[6]	$\bar{x} \pm s$	N	
Tier I	ME	2S	76.55 ± 11.15	17	87.18	6.13 ± 4.66	16	2.77	2.24 ± 1.62	17	3.08	3 159.01 ± 48.90	14
		4S	41.72 ± 12.16	30	60.47/— ²⁾	4.45 ± 2.28	29	2.51	1.42 ± 0.66	26	2.33	3 156.52 ± 22.05	30
	AE	4S	36.87 ± 13.75	29	57.27/45.81 ²⁾	5.25 ± 1.93	28	2.38	1.99 ± 0.83	28	1.76	3 143.30 ± 21.52	29
Tier II	ME	2S	69.49 ± 8.25	22	78.46	4.30 ± 2.69	22	2.77	1.25 ± 0.37	20	3.08	3 165.63 ± 27.47	21
		4S	35.90 ± 8.47	43	52.09/— ²⁾	3.01 ± 1.49	39	2.51	1.43 ± 1.06	38	2.33	3 141.94 ± 21.19	41
	AE	4S	30.67 ± 7.98	45	49.34/36.12 ²⁾	3.86 ± 2.45	44	2.38	1.58 ± 1.14	46	1.76	3 141.15 ± 21.01	40

1) 台架测试所用轻柴油碳含量为 85.51% ~ 86.83%; \bar{x} 为平均值; s 为标准差; N 为样本量; 2) 斜线“/”前后数据分别为中速机和高速机 NO_x 基于燃油的排放因子; 3) 燃油碳含量为 85% ~ 87.5% 时对应的数据为 3 114 ~ 3 206^[6]

2.2 基于做功的排放因子

采用基于船舶活动的方法确定船舶废气排放量时, 需要根据具体船型的主、副机功率需求和运行时间, 结合基于做功的排放因子进行计算. 根据柴油机排放台架测试过程中测量得到的各工况运行功率以及经测量和计算得到的各废气成分的质量流量, 计算得到每台柴油机在每一测试工况下的各废气成分基于做功的排放因子. 它们在主、副机不同负荷工况下的数值大小如图 1 ~ 3 所示.

对各船用柴油机母型机在各测试工况下的比排放量因子按式(1)、(2)中的加权系数进行加权处理, 然后按柴油机类型取算术平均值, 得到各类型柴油机 NO_x 、 CO 、 HC 和 CO_2 基于做功的排放因子, 如表 2 所示. NO_x 排放因子在 IMO NO_x Tier I 和 Tier II 标准的限值要求内, 也比其他研究^[3, 4, 20, 23] 的使用值普遍偏低; 主机 CO_2 排放因子低于文献[3, 4, 23]的使用值, 而主要由我国自主研发生产的四冲

程中、高速副机 CO_2 排放因子高于相关文献的使用值, 说明我国自主研发生产的柴油机的经济性水平还有进一步提升的空间; CO 和 HC 排放因子与同类研究^[3, 4, 15, 23] 的取值 (数据主要来源于 Entec、IVL、ICF 及 USEPA 等机构早期的研究) 也存在一定的差异. 文献[9]对实船 22 台副机的测试表明, NO_x 排放因子实测值为 $9.6 \sim 20.2 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, CO 排放因子实测值为 $0.33 \sim 1.71 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, HC 排放因子实测值为 $0.07 \sim 0.41 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, CO_2 排放因子实测值为 $653 \sim 803 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, 表 2 中的统计分析结果与文献[9]各排放因子的实测值水平相当.

根据图 1 ~ 3, 主机 NO_x 、 CO_2 排放因子与负荷关系以及副机 NO_x 、 CO 、 HC 和 CO_2 排放因子与负荷关系均有较一致的变化趋势; 二冲程主机与四冲程主机的 CO 排放因子与负荷的变化规律并不完全一致; 主机 HC 排放因子的分布比较离散, 部分值

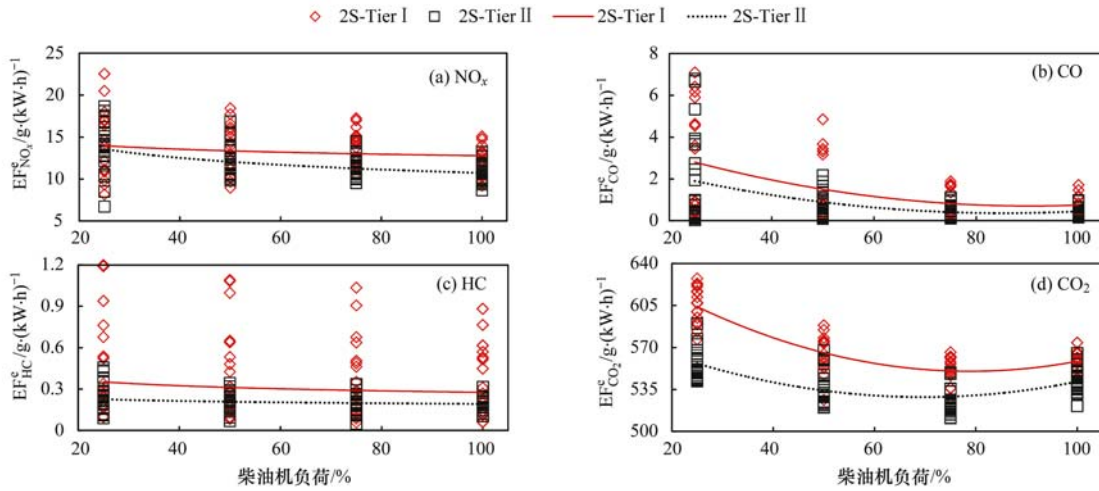


图 1 二冲程主机基于做功的排放因子-负荷关系

Fig. 1 Relationships of energy-based emission factors against engine load for 2-Stroke main engines

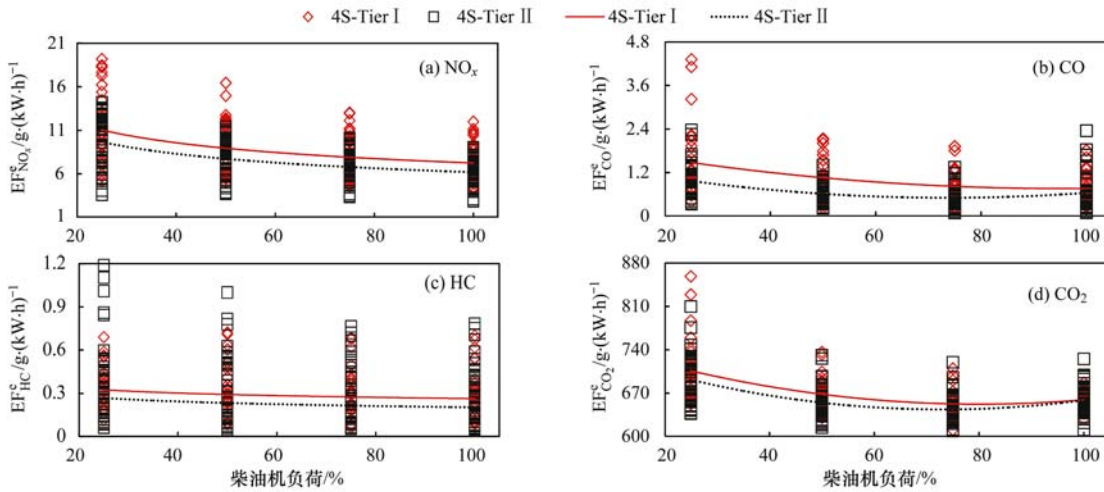


图 2 四冲程主机基于做功的排放因子-负荷关系

Fig. 2 Relationships of energy-based emission factors against engine load for 4-Stroke main engines

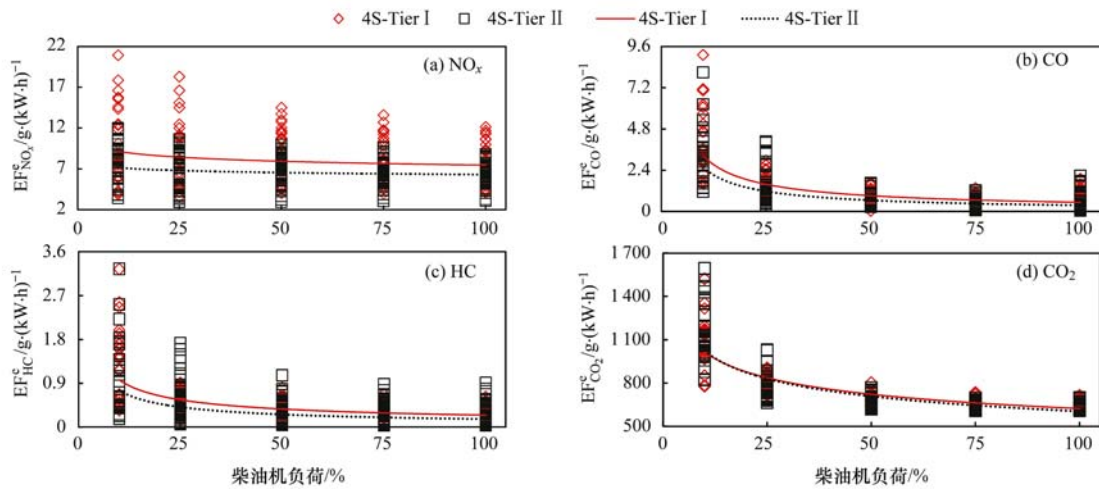


图 3 副机基于做功的排放因子-负荷关系

Fig. 3 Relationships of energy-based emission factors against engine load for auxiliary engines

表 2 基于做功的排放因子¹⁾/g·(kW·h)⁻¹

Table 2 Energy-based emission factors/g·(kW·h)⁻¹

柴油机类型	EF _{NO_x} ^e			EF _{CO} ^e			EF _{HC} ^e			EF _{CO₂} ^e				
	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[4]	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[3,4,23]	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[3,4,23]	$\bar{x} \pm s$	N	数据 ^[3,4,23]		
Tier I	ME	2S	13.64 ± 2.10	17	17.0	1.11 ± 0.85	16	1.4	0.40 ± 0.29	17	0.6	562.50 ± 9.40	16	620
		4S	8.86 ± 2.69	30	13.0	0.90 ± 0.42	28	1.1	0.31 ± 0.15	27	0.5	666.79 ± 24.41	30	683
	AE	4S	8.67 ± 3.30	29	13.0	1.35 ± 0.55	27	1.1	0.50 ± 0.21	28	0.4	745.18 ± 47.52	28	683
Tier II	ME	2S	11.75 ± 1.33	22	15.3	0.74 ± 0.48	22	1.4	0.21 ± 0.06	20	0.6	534.04 ± 9.82	21	620
		4S	7.51 ± 1.72	43	11.2	0.61 ± 0.28	38	1.1	0.31 ± 0.23	40	0.5	655.86 ± 23.50	40	683
	AE	4S	6.83 ± 1.72	46	11.2	0.80 ± 0.35	39	1.1	0.41 ± 0.32	43	0.4	715.46 ± 66.32	44	683

1) \bar{x} 为平均值; s 为标准差; N 为样本量

出现较大的偏离. 主、副机各废气成分排放因子的变化规律又各有不同. 为了便于采用基于船舶活动的方法测算不同负荷工况下各废气成分排放量, 本研究采用两种统一的表达式对各废气成分基于做功的排放因子与柴油机负荷间的关系进行拟合; 另外, 为简化表达式, 这里也不详细区分柴油机生产年份, 而将满足 IMO NO_x Tier I 和 Tier II 标准的船用柴油机合并考虑, 这主要会对 NO_x 排放因子带来一定的误差, 而对 CO、HC 和 CO₂ 排放因子的影响并不显著.

主机 NO_x 和 HC 排放因子与柴油机负荷间的关系以及副机 NO_x、CO、HC、CO₂ 排放因子与柴油机负荷间的关系采用幂函数进行拟合, 其关系可表达为:

$$EF_i^e = a \cdot FL^{-b} \quad (3)$$

主机 CO 和 CO₂ 排放因子与柴油机负荷间的关系采用二次多项式进行拟合, 其关系可表达为:

$$EF_j^e = a \cdot FL^2 - b \cdot FL + c \quad (4)$$

式中, EF^e 为基于做功的排放因子, g·(kW·h)⁻¹; FL 为柴油机负荷, %; i, j 为废气成分编号; a, b, c 为方程系数.

其中各种拟合公式的系数列于表 3 中. 对带调距桨定速运转的中、高速主机排放因子与负荷之间的关系可按公式(3)计算. 需要说明的是, 这里基于做功的排放因子与柴油机负荷之间的幂函数或二次多项式关系只是统计平均的结果, 某一具体机型可能并不一定满足这样的对应关系.

2.3 不确定性分析

在台架测试、数据收集和统计分析的过程中, 不可避免地会存在测量误差、数据缺失或数据代表性不足等问题, 使得统计分析得到的排放因子存在一定的不确定性. 将本研究的统计分析结果用于船舶废气排放测算时, 通过定性分析可确定以下几个方面的因素可能导致测算结果存在误差: ①限于数

表 3 排放因子拟合公式的系数¹⁾

Table 3 Coefficients of fitting formulas for emission factors

排放因子 /g·(kW·h) ⁻¹	系数	ME		AE
		2S	4S	4S
EF _{NO_x} ^e	a	11.667	6.847	6.964
	b	0.140	0.328	0.109
	R^2	0.923	0.997	0.965
	Sig.	0.039	0.002	0.003
EF _{CO} ^e	a	4.560	1.640	0.475
	b	7.828	2.670	0.846
	c	3.850	1.713	—
	R^2	0.994	0.993	0.876
EF _{HC} ^e	Sig.	0.074	0.083	0.019
	a	0.281	0.281	0.238
	b	0.157	0.197	0.685
	R^2	0.875	0.997	0.964
EF _{CO₂} ^e	Sig.	0.065	0.002	0.003
	a	160.240	191.320	606.693
	b	238.028	290.666	0.240
	c	625.830	759.007	—
EF _{CO₂} ^e	R^2	0.995	0.999	0.913
	Sig.	0.072	0.031	0.011

1) R^2 为决定系数; Sig. 为显著性水平

据的可获得性, 还缺少部分机型的样本(尤其对于 2000 年以前我国生产的船用柴油机的排放测试数据, 国内完全是空白), 数据的代表性还有一定的欠缺; ②不同的机型, 其排放水平可能存在较大的差异, 即使是同一族/组的机型, 其排放水平也并不完全一致, 因此, 统计平均的结果与具体船舶发动机的排放水平可能存在差异; ③本研究的统计结果反映的是新机出厂时的排放水平, 柴油机装船使用一定年限后, 排放技术水平可能会发生变化, 导致测算结果存在误差; ④船用柴油机母型机排放台架测试所用燃油均为轻柴油, 而实际营运船舶主要使用船用燃料油, 这将导致测算结果存在误差(但台架测试表明柴油机燃用轻柴油或船用燃料油其 NO_x、CO、HC、CO₂ 排放因子并不存在显著差异, 燃油品质的影响主要体现在硫含量的不同而导致 SO₂ 和 PM 排

放因子存在较大差异);⑤本研究中没有对中速机和高速机进行区分,这主要会导致 NO_x 排放测算存在误差。

3 结论

(1)通过对大量的船用柴油机母型机排放测试报告的统计分析,能比较全面、准确地获知我国船用柴油机的排放技术水平。对我国生产的船用柴油机母型机排放测试报告的统计分析表明:满足 IMO NO_x Tier I 标准的二冲程主机、四冲程主机和四冲程副机基于燃油的 NO_x 排放因子分别为 76.55、41.72 和 36.87 kg·t⁻¹,CO 排放因子为 4.45 ~ 6.13 kg·t⁻¹,HC 排放因子为 1.42 ~ 2.24 kg·t⁻¹,CO₂ 排放因子为 3 143.30 ~ 3 159.01 kg·t⁻¹;满足 IMO NO_x Tier II 标准的二冲程主机、四冲程主机和四冲程副机基于燃油的 NO_x 排放因子分别为 69.49、35.90 和 30.67 kg·t⁻¹,CO 排放因子为 3.01 ~ 4.30 kg·t⁻¹,HC 排放因子为 1.25 ~ 1.58 kg·t⁻¹,CO₂ 排放因子为 3141.15 ~ 3165.63 kg·t⁻¹。

(2)我国生产的满足 IMO NO_x Tier I 标准的各类型船用柴油机基于做功的 NO_x 排放因子为 8.67 ~ 13.64 g·(kW·h)⁻¹,CO 排放因子为 0.90 ~ 1.35 g·(kW·h)⁻¹,HC 排放因子为 0.31 ~ 0.50 g·(kW·h)⁻¹,CO₂ 排放因子为 562.50 ~ 745.18 g·(kW·h)⁻¹;我国生产的满足 IMO NO_x Tier II 标准的各类型船用柴油机基于做功的 NO_x 排放因子为 6.83 ~ 11.75 g·(kW·h)⁻¹,CO 排放因子为 0.61 ~ 0.80 g·(kW·h)⁻¹,HC 排放因子为 0.21 ~ 0.41 g·(kW·h)⁻¹,CO₂ 排放因子为 534.04 ~ 715.46 g·(kW·h)⁻¹。各类型主、副柴油机基于做功的排放因子与柴油机负荷密切关系。其中,主机 NO_x 和 HC 排放因子以及副机 NO_x、CO、HC、CO₂ 排放因子随柴油机负荷的减小而增大,其与柴油机负荷间的关系可采用幂函数进行拟合;主机 CO 和 CO₂ 排放因子与柴油机负荷间的关系可用二次多项式进行拟合。

(3)通过对国外文献采用的排放因子进行简单的修正难以真实反映我国船用柴油机的排放水平,尤其对于我国沿海及内河运输船舶使用的柴油机形式多样,更是需要收集更多的样本,分类型、分工况进行大量的试验研究,为我国船舶排放清单的编制提供可靠的基础数据。

参考文献:

[1] 交通运输部. 2014 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].

http://www.moc.gov.cn/zfxgk/bnssj/zghs/201504/t20150430_1810598.html, 2015-04-30.

- [2] 林楚彬,赵黛青,蔡国田,等. 广东货船水运的温室气体排放和低碳发展对策[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(12): 1340-1348.
- [3] 伏晴艳,沈寅,张健. 上海港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(5): 57-64.
- [4] 谭建伟,宋亚楠,葛蕴珊,等. 大连海域远洋船舶排放清单[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(12): 1426-1431.
- [5] International Maritime Organization. Second IMO GHG study 2009[R]. London: International Maritime Organization, 2009.
- [6] International Maritime Organization. Third IMO GHG study 2014 [R]. London: International Maritime Organization, 2014.
- [7] Trozzi C, Vaccaro R, Nicolo L. Air pollutants emissions estimate from maritime traffic in the Italian harbours of Venice and Piombino[J]. Science of the Total Environment, 1995, **169**(1-3): 257-263.
- [8] Corbett J J, Koehler H W. Updated emissions from ocean shipping [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D20): 4650.
- [9] Cooper D A. Exhaust emissions from ships at berth [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(27): 3817-3830.
- [10] Hulskotte J H J, van der Gon H A C D. Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(9): 1229-1236.
- [11] Schrooten L, De Vlieger I, Panis L I, et al. Emissions of maritime transport; a European reference system[J]. Science of the Total Environment, 2009, **408**: 318-323.
- [12] Endresen Ø, Bakke J, Sørgård E, et al. Improved modelling of ship SO₂ emissions—a fuel-based approach [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(20): 3621-3628.
- [13] Sinha P, Hobbs P V, Yokelson R J, et al. Emissions of trace gases and particles from two ships in the southern Atlantic Ocean [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(15): 2139-2148.
- [14] Moldanová J, Fridell E, Popovicheva O, et al. Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(6): 2632-2641.
- [15] Winnes H, Fridell E. Emissions of NO_x and particles from manoeuvring ships [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2010, **15**(4): 204-211.
- [16] Eyring V, Isaksen I S A, Bernsten T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(37): 4735-4771.
- [17] Miola A, Ciuffo B. Estimating air emissions from ships; meta-analysis of modelling approaches and available data sources [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(13): 2242-2251.
- [18] Blasco J, Durán-Grados V, Hampel M, et al. Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems [J]. Environment International, 2014, **66**: 44-47.
- [19] 杨静,尹佩玲,叶斯琪,等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- [20] Yau P S, Lee S C, Corbett J J, et al. Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 2012, **431**: 299-306.

- [21] Ng S K W, Loh C, Lin C B, *et al.* Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 102-112.
- [22] 叶斯琪, 郑君瑜, 潘月云, 等. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 537-547.
- [23] Song S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 288-297.
- [24] 顾伟红, 徐瑞华. 中国国际海运船队温室气体排放测算研究 [J]. *中国造船*, 2013, **54**(3): 169-176.
- [25] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, 2006-06.
- [26] Fu M L, Ding Y, Ge Y S, *et al.* Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 222-229.
- [27] 尹航, 丁焰, 葛蕴珊, 等. 内河船舶柴油机的实际排放特征 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(5): 470-476.
- [28] International Maritime Organization. Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines [S]. London: International Maritime Organization, 1997.
- [29] 中国船舶工业集团公司. GB/T 15097-2008, 船用柴油机排气排放污染物测量方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行